

第2節 シリコンフォトニクスを用いた光通信帯域対応光渦多重器の開発

東京工業大学 雨宮 智宏, 西山 伸彦

産業技術総合研究所 吉田 知也, 渥美 裕樹, 榎原 陽一

はじめに

400 ギガビット光ネットワークの本格的な導入に伴い、DP (Dual-polarization) -QPSK や DP-16QAM に代表されるコヒーレント光トランシーバ技術が実用レベルに達している¹⁾。大容量高速伝送に対する要求は今後もいっそう高まることが予想され、これに応える手段として、従来の波長多重方式に加えて光の二つの自由度 (偏波と光渦) を積極的に利用した伝送方式に多くの注目が集まっている。偏波を積極的に利用した例としては、6-polarization QPSK (6P-QPSK)²⁾ や 3D simplex³⁾ のような 4 次元信号空間を効率的に利用することで受信感度を高めた方式や、ストークスベクトルに情報を乗せることで、低コストリンクを可能とする方式が提案されている^{4,5)}。一方、光の軌道角運動量にあたる光渦 (OAM: Orbital angular momentum) についても、工学的に未開拓の領域が多く残っていることから、次世代 6G 大容量伝送のコア技術の一つとして目されている。光渦は図 1 に示すように、等位相面が一波長で 2π の整数倍 ($2\pi \times l$: l は光渦モードのチャージ数と呼ばれる) になるようにらせん形状を成しており、チャージ数の異なるモードは互いに直交性があるため、波面のらせん周期に情報を乗せることで相当数のチャンネル多重化が可能となる。自由空間データリンクではあるものの光渦多重と波長多重を組み合わせることで 100 Tbit/s 級の伝送も実現されている⁶⁾。

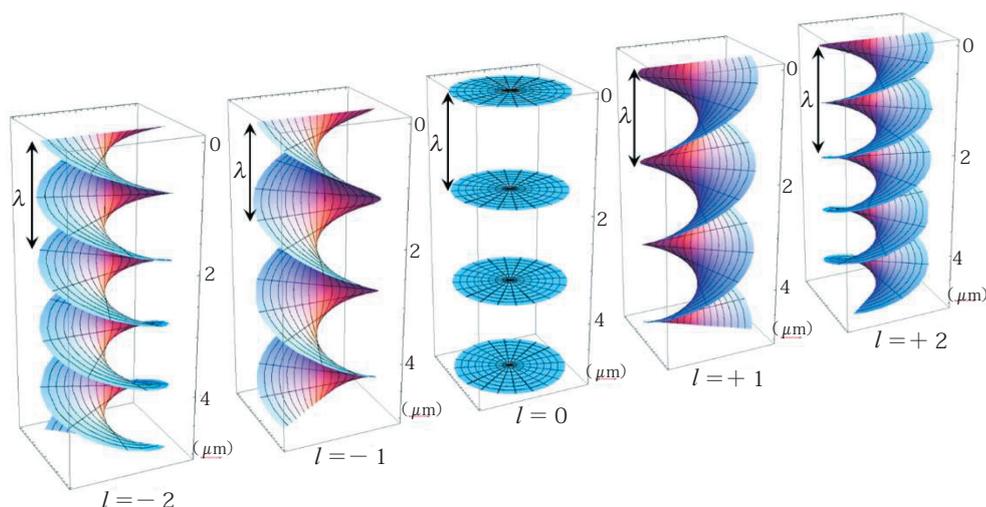


図1 チャージ数が-2から2までの5つの光渦の等位相面: チャージ数の異なる光渦は互いに直交性があるため、これらは多重化できる

現在利用されている光ファイバ通信 (自由空間を使わない光ファイバで構成された通信) に光渦を導入する際には、図 2 に示すように、送受信領域と伝送領域のそれぞれにおいて以下の要素が必須となる。

A. 送受信領域: チップ型光渦多重器

実験室レベルで光渦の合分波を実現する際には、光学定盤上に比較的大きな光学系 ($> 1\text{m}^2$) を組む必要があり、光通信システムに用いる系としては現実的ではない。よって、小型化・低コスト化の面からチップ化が必要不可欠となる。また、既存の多重化技術との整合性があることが望ましい。特に、波長多重と併用するために、Cバンド全域において、素子の波長依存性が小さいことが必須となる。

B. 伝送領域: 光渦信号を伝搬可能な光ファイバ

光渦はドーナツ形状の伝搬モード分布を有しており、通常の光ファイバではモードを安定に維持したまま伝送することができない。そのため、長距離通信を実現するためには新しい光ファイバの開発が必要となる。

2013年に、ボストン大学のグループによって開発された特殊な屈折率分布をもつ光ファイバによって、20メートルの距離にわたって光渦モードが安定して伝搬できることが示されており、以後さらなる改良が進められている⁷⁾。

この数年間、東京工業大学と産業技術総合研究所では、上記Aの実現を目指して、シリコンフォトニクス技術による光渦偏波多重素子（5光渦×2偏波）の開発を行ってきた。以下、その詳細を述べる。

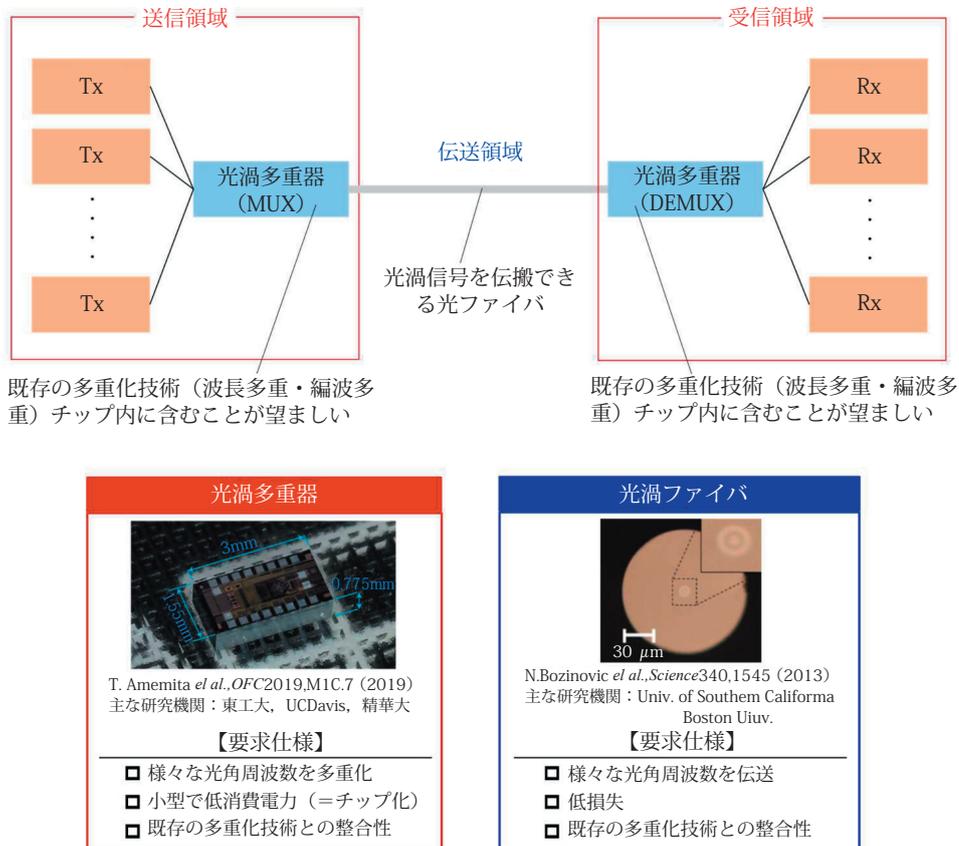


図2 光渦多重通信の概要と必須となる素子群：送受信領域ではチップ型の光渦多重器，伝送領域では光渦を伝送可能な光ファイバが必要となる

1. シリコンフォトニクスを用いた光渦多重

シリコンフォトニクスを用いて光渦多重を行う場合、図3aに示すように、標準的なシリコンフォトニクスプロセスで一括作製可能な「スターカプラ」および「垂直結合器」の二つを組み合わせるのが一般的である⁸⁾。まず、入力光はスターカプラにおいて特定の位相差をもった複数の出力光に分波され、その後、それらの位相差を維持したまま垂直結合器から光を取り出すことで、光渦多重がなされる。このとき、垂直結合器の射出端は同心円上に並んだ構造となっており、出力光は自動的に空間位相が同心円上に分布した光渦に変換される（これにより、スターカプラの各ポートは光渦のそれぞれのチャージ数に対応することになる）。逆も全く同じ原理で、光渦多重された信号を垂直結合器に入力することで、スターカプラの各ポートから分波された信号を得ることができる。

上記の構成に基づいて光渦多重を行う際にポイントとなるのは、「如何に効率よく同心円上の空間位相分布を実現するか」ということである。スターカプラを用いて導波路間に位相差を与える手法は広く利用されており、これをチップ上で実現することは比較的容易である。その一方、それら位相差のついた光を同心円上から出射させる技術については、グレーティングカプラや光アンテナを用いたものが提案されているものの、波長に依存した損失や位相ずれの観点から、未だに実用に足る手法は確立されていない。そのような中、当グループでは、垂直結合器に「イオン注入プロセスによる3次元湾曲シリコン導波路」を用いることで、波長無依存で低損失な再現性の高い光渦多重技術を開発することに成功している⁹⁾ (図3b)。

3次元湾曲シリコン導波路の形成手法は以下のとおりである。まず、エッチング処理により、シリコン導波路の先端周囲のSiO₂クラッドを除去することで、シリコンのみを露出させた片持ち梁構造を形成する。その後、イオン注入を行い、注入中に生じる応力を利用して片持ち梁構造を3次的に湾曲させ、最後にSiO₂被覆を等方成膜することで先端部にコリメートレンズ機能をもたせる(図3c参照のこと)。本手法を用いることで、5 μm スポット径の先球ファイバ使用時に、偏波無依存、結合損失 2.5 dB 以下 /facet の高効率、0.5dB 損失増大帯域 > 130nm の広帯域結合を得ることが可能となる¹⁰⁻¹²⁾。

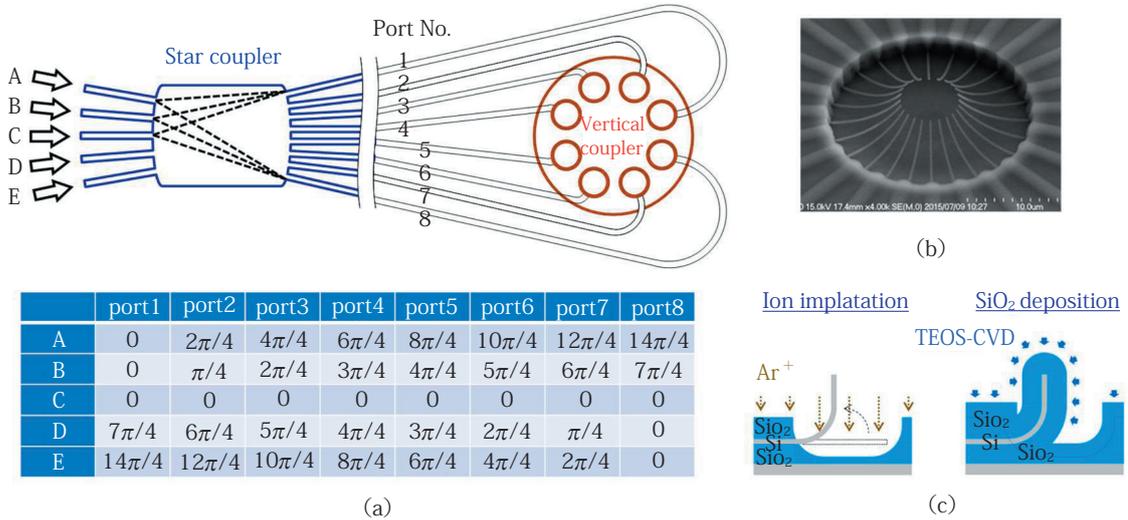


図3 (a) シリコンフォトニクスを用いて光渦多重を行う際の素子の基本構成とスターカプラで得られる各ポート間の位相差 (b) イオン注入プロセスによる3次元湾曲シリコン導波路 (c) 3次元湾曲シリコン導波路の形成手法

2. 光渦・偏波多重素子の構成

前節の技術をベースとして、ワンチップ上に光渦多重と既存多重技術である偏波多重を同時に行う素子を開発した。素子1個あたりのレイアウト図を図4aに示す。本素子では、二つのスターカプラからの計16本の出力端を8本ずつ二つの同心円周上に並べることで、光渦多重と偏波多重を同時に実現した。本レイアウトでは、全円周(360°)

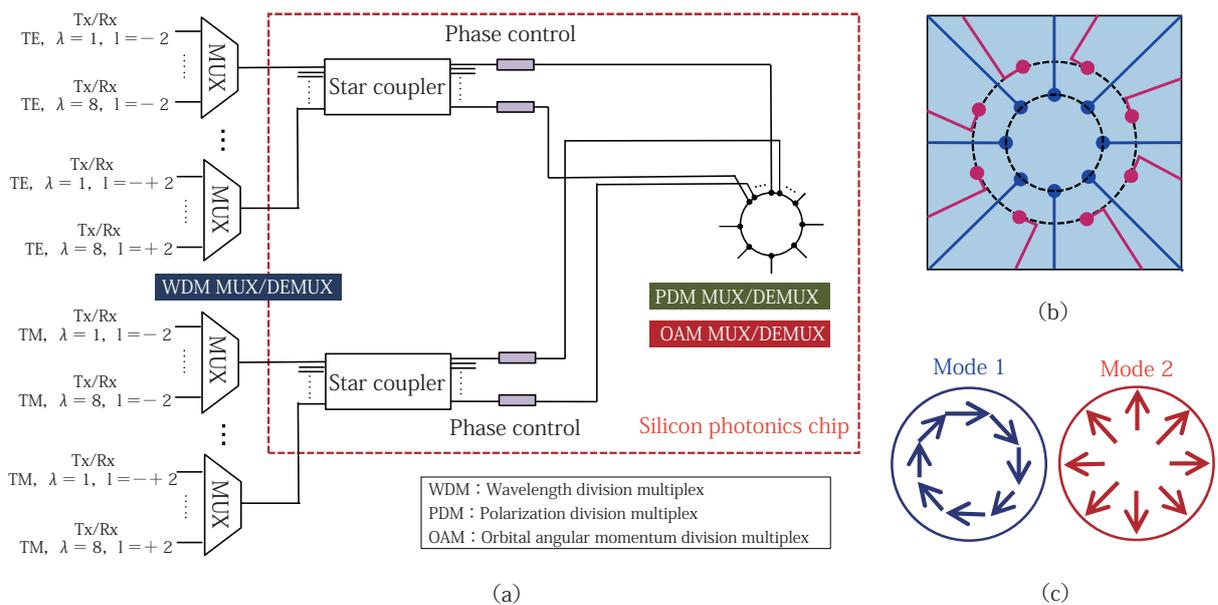


図4 (a) 既存の多重化技術(波長多重・偏波多重)を含んだ光渦多重素子のチップ内構成図(本研究では、赤点線の部分をチップ化している) (b) 光渦偏波多重のための導波路端配置図(各色は各偏波のためのレイアウトを示す) (c) 光渦内における二つの偏光状態

に亘って $2\pi l$ ($l = -2 \sim +2$) の位相変化を 8 分割し、時計回りに $2\pi/8$ ずつ位相が変わるように各出力端を配置した。図 4b に示すように、二つの円周上の導波路端はそれぞれ円に対するアプローチ方向が異なり、これによって、光渦多重を実現しながら偏波多重も同時に行う（多重化された偏波方向については図 4c を参照のこと）。前節で言及したように、開発素子は C バンド帯域に対して波長依存性が極めて少ないため、アレイ導波路回折格子（Arrayed waveguide gratings : AWG）などを用いて波長多重をあらかじめ行うことで、全体として光渦・偏波・波長の各多重方式を組み合わせた伝送も可能となる。

図 4a に示すようなレイアウトは、さまざまな条件（例：波長の種類を増やす、光渦の種類を増やす、偏波方向を変える等）の多重化に適応できることから、既存の多値変調方式、多次元変調方式に光渦多重を組み込む際の汎用レイアウトデザインとして考えることができる。

3. 開発素子の評価

開発した光渦偏波多重素子のチップ写真および赤外カメラ画像を図 5ab に示す（3 次元湾曲シリコン導波路端周囲の走査電子顕微鏡画像も併せて図 5c に示す）。デバイスサイズは $3 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 程度に収まっており、チップレベルで、光渦多重と偏波多重を同時に実現することに成功した。本素子では、スターカプラの出力側の導波路 16 本にそれぞれ熱光学効果による位相調整器が付いており、それらを制御することによって、各導波路間の位相差を維持したまま 3 次元湾曲シリコン導波路端から信号光が射出される。本素子の基本特性を評価するために、空間位相変調器を用いた光学系から各チャージ数を有する光渦信号光を生成し、それを本素子に導入することで、対応するファイバから光が射出されているかどうかを観測した。5 光渦 ($l = -2 \sim +2$) \times 2 偏光の各信号光に対する 10 ポート全ての出力強度を観測した結果、ポート間のクロストークは 15dB 以上となった。

モジュール化した光渦偏波多重素子を図 6a に示す。光ファイバからスターカプラの各導波路への結合はファイバアレイで行っており、3 次元湾曲導波路の射出端上部にはレンズを配置しコリメート光が得られるようにした。モジュールの各制御線は位相調整器に繋がっており、上記の基本特性評価の際に用いた電流値を各制御線に入力することで、光渦・偏波の同時多重を行うことができる。本評価では、予め AWG を用いて波長多重信号を生成した後、本素子を用いて光渦・偏波多重を行うことで、伝送実験を実施した。結果を図 6b に示す。ここでは、25 Gbps の NRZ 信号に対して 5 光渦 ($l = -2 \sim +2$) \times 2 偏波 \times 8 波長 (ITU No. 32.5 ~ ITU No. 36) 多重を行った際の両側 2 波長に対してアイパターンを示したものであり、これにより 2 Tbit/s 級のエラーフリー伝送が確認できていることが分かる。

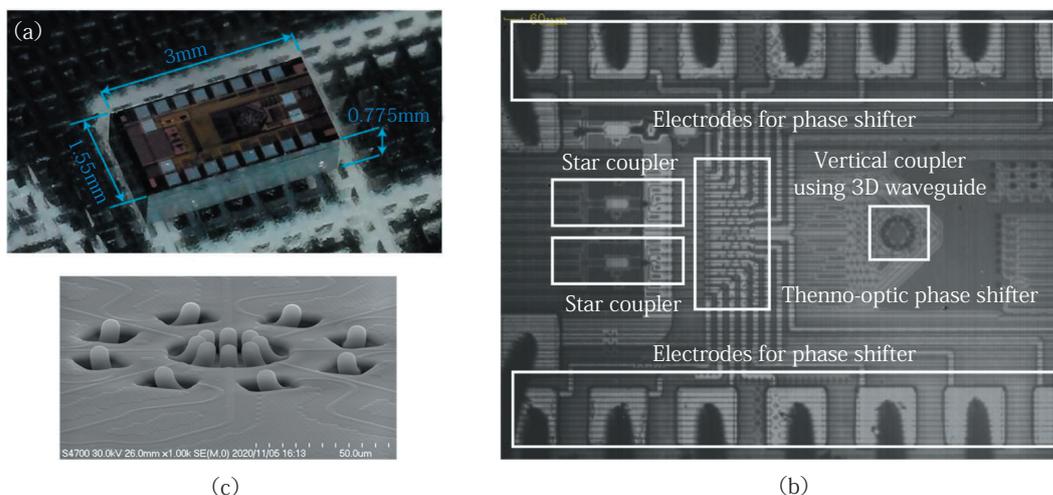


図 5 (a) 開発した光渦偏波多重素子のチップ写真 (b) チップの赤外カメラ画像（レイアウト詳細は図 4 を参照のこと） (c) 光渦偏波多重のための 3 次元湾曲シリコン導波路端配置

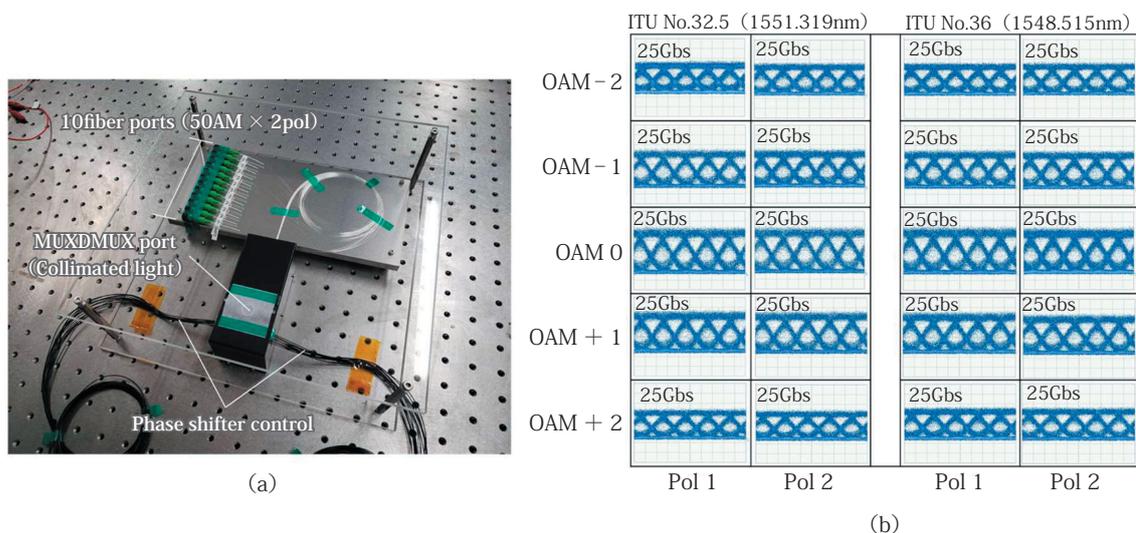


図6 (a) モジュール化した光渦偏波多重素子 (b) 5 光渦 × 2 偏波 × 8 波長多重の 2 Tbit/s 級伝送評価

おわりに

光通信技術において、信号の多重化資源が増えることは、通信容量の劇的な大容量化につながる。前述したように、光渦は波面のらせん周期に情報を乗せることから、理論上は相当数のチャネル多重化が可能であり、次世代 6G における大容量伝送のキーテクノロジーとなり得る。将来的に光渦による多重化技術が市場導入されることになった際、本モジュールと同系統の素子が広く用いられることを願って止まない。

文 献

- 1) W Forysiak, "Progress in InP-based photonic components and sub-systems for digital coherent systems at 100Gbit/s and beyond", *Proc. ECOC 2013*, Mo.3.C.2 (2013)
- 2) E. Agrell and M. Karlsson, "Power-efficient modulation formats in coherent transmission systems," *J. Lightwave Technol.* **27**, 5115 (2009)
- 3) H. Yamazaki, Y. Hashizume, and T. Saida, "Simple three-dimensional simplex modulator," *Proc. OFC 2014*, W1I.3 (2014)
- 4) D. Che, A. Li, X. Chen, Q. Hu, Y. Wang, and W. Shieh, "160-Gb/s stokes vector direct detection for short reach optical communication," *Proc. OFC 2014*, Th5C.7 (2014)
- 5) S. Ghosh, T. Tanemura, Y. Kawabata, K. Katoh, K. Kikuchi, and Y. Nakano, "Simple direct-detection-based Stokes vector receiver circuit on InP," *Proc. OFC 2017*, Th1A.6 (2017)
- 6) H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M. J. Willner, B. I. Erkmen, K. M. Birnbaum, S. J. Dolinar, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. Tur, and A. E. Willner, "100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength," *Optics Lett.* **39**, 197 (2014)
- 7) N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, and S. Ramachandran, "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers," *Science* **340**, 1545 (2013)
- 8) T. Su, R. P. Scott, S. S. Djordjevic, N. K. Fontaine, D. J. Geisler, X. Cai, and S. J. B. Yoo, "Demonstration of free space coherent optical communication using integrated silicon photonic orbital angular momentum devices," *Optics Express* **20**, 9396 (2012)

- 9) T. Amemiya, T. Yoshida, Y. Atsumi, N. Nishiyama, Y. Miyamoto, Y. Sakakibara, S. Arai, "Orbital Angular Momentum Mux/Demux Module Using Vertically Curved Si Waveguides," 2019 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2019), M1C.7, Mar. 2019
- 10) T. Yoshida, S. Tajima, R. Takei, M. Mori, N. Miura, and Y. Sakakibara, "Vertical silicon waveguide coupler bent by ion implantation", *Optics Express* 23, 29449 (2015)
- 11) T. Yoshida, E. Omoda, Y. Atsumi, T. Nishi, S. Tajima, N. Miura, M. Mori, and Y. Sakakibara, "Vertically curved Si waveguide coupler with low loss and flat wavelength window", *J. Lightwave Technol.* 34, 1567 (2016)
- 12) Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Broad-band surface optical coupler based on a SiO₂-capped vertically curved silicon waveguide", *Optics Express* 26, 10400 (2018)